

В.С ГАПОНОВ., А.В ГАЙДАКА.

ПРО ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСУ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

The article presents selection of technological methods security of resource bearings.

Підшипники кочення за характером функціонування та причинами виходу з ладу поділяють на групи: приладні, шпindelні, моторні, загальномашинобудівного призначення, залізничні, будівельних та сільськогосподарських машин, спеціального призначення [1,2].

Для підшипників приладів критеріями відказу є збільшення нестабільності моменту опору обертанню, а також нестабільність частоти та амплітуди радіальних і осьових вібрацій ротора [3].

Для шпindelних підшипників типові критерії відказу – мала точність обертання, підвищена вібрація, великий момент опору обертання [4].

Деякі приладні, шпindelні та моторні підшипники об'єднують в групи високошвидкісних та надшвидкісних, для яких, згідно з [5], причинами виходу з ладу є контактна витривалість робочих поверхонь деталей від дії високих дисбалансних навантажень і недостатній відвід тепла від зон контакту.

Критерієм працездатності підшипників загальномашинобудівного призначення є втомні руйнування робочих поверхонь кілець і тіл кочення [6].

Підшипники залізничного транспорту з експлуатації вибраковують за втомним руйнуванням робочих поверхонь кілець і тіл кочення, зносам та задирам торців роликів і бортів кілець, руйнуванням деталей [7].

Підшипники будівельних та сільськогосподарських машин стають непридатними, в основному, внаслідок абразивного зношування деталей [8].

Підшипники спеціального призначення, залежно від умов експлуатації, можуть мати абразивний чи корозійний знос, залишкові деформації від силових та температурних дій, а також інші види пошкоджень [9].

Аналіз основних причин та наслідків характерних видів пошкоджень робочих поверхонь деталей переважної більшості підшипників кочення представлено у вигляді схеми на рис. 1.

З аналізу рис. 1 постає наступне:

- поверхневі шари мають низьку контактну міцність;
- на поверхнях деталей відбувається незмірне теплоутворення;
- мастильні матеріали мають незадовільні експлуатаційні властивості.

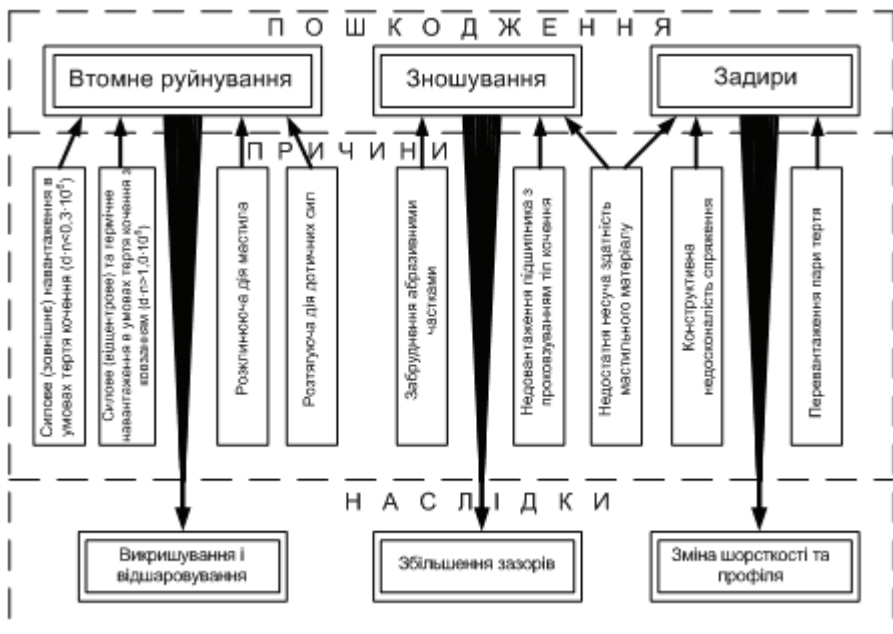


Рис. 1. Причини та наслідки пошкоджень робочих поверхонь деталей підшипників кочення.

В підвищенні трибологічної надійності вузлів тертя останнім часом все більше віддають перевагу технологічним методам, оскільки конструктивні та експлуатаційні засоби майже вичерпали свої можливості. Натепер відомо десятки технологічних методів захисту та зміцнення поверхневих шарів, які відрізняються технологією здійснення, механізмами зміцнення та обладнанням [10-12]. Їх можна умовно уявити трьома групами:

- методи, що зміцнюють склад, структуру, фізико-хімічні властивості поверхневого шару основного матеріалу, - методи модифікування;
- методи, за допомогою яких утворюють антифрикційні та зносостійкі покриття і плівки;
- комбіновані методи, які поєднують модифікування поверхневих шарів основного матеріалу з утворенням захисних покриттів і плівок.

Захист та зміцнення робочих поверхонь деталей підшипників кочення здійснюють видами обробки, що представлені в таблиці.

Вибрати найкращу з вказаних технологію забезпечення потрібного ресурсу конкретної групи підшипників кочення за технологічними, економічними та екологічними критеріями в теперішній час дуже важко, оскільки відсутня науково обґрунтована процедура конкретних дій.

№	Вид технологічної обробки	Результат обробки	Вплив на властивості мастила	Потреба в спец-обладнанні
1	Механічна [13, 14]	Мод.шар (покриття)	не має	є
2	Термомеханічна [15]	Мод.шар	не має	є
3	Термічна [15, 16]	Мод.шар	не має	є
4	Хіміко-термічна [15, 17]	Мод.шар	не має	є
5	Вакуумна іонно-плазмова [18, 19]	Мод.шар з покриттям	не має	є
6	Імплантація [18, 20]	Мод.шар	не має	є
7	Лазерна [18]	Мод.шар	не має	є
8	Електроосадженням [14, 21]	покриття	не має	є
9	Триботехнічна [22, 23]	Покриття/ мод.шар з покриттям	є	не має

Отож, розробку нових і вдосконалених існуючих алгоритмів, методів та моделей багатокритеріального вибору захисних і зміцнюючих технологій для робочих поверхонь підшипників кочення треба вважати актуальним і важливим завданням проблеми підвищення надійності машин.

Відомо підхід до вибору технології зміцнення на основі аналізу виробничих витрат та зносостійкості деталей [24], а також підхід до вибору зносостійких покриттів на основі моделей, що описують структурний зв'язок між технологічними параметрами і необхідними властивостями покриттів [25].

Вибравши технологію захисту і зміцнення робочих поверхонь деталей пар тертя з використанням зазначених підходів, не завжди вдається досягти кінцевої мети, а саме – забезпечити потрібні експлуатаційні характеристики вузлів тертя, наприклад, підшипників кочення, з найменшими витратами. Обидва підходи потребують проведення випробувань пар тертя на знос, а для підшипників кочення – ресурсних випробувань згідно з вимогами галузевого стандарту. Однак оцінити ефективність вибраної технології за ресурсним випробуванням підшипників неможливо з причини значних труднощів врахування великої кількості конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів впливу. Тому вибір технології захисту і зміцнення робочих поверхонь підшипників кочення на основі відомих підходів треба визнати непридатним.

В роботі [26] запропоновано комплексний теоретико-експериментальний підхід до вибору технологічного методу обробки робочих поверхонь підшипників кочення. Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану пластини з багатошаровим покриттям при контактному статичному навантаженні розподіленого силою дало можливість виявити зв'язок фізико-механічних характеристик матеріалу

покриття з величиною контактних напружень. На цій основі сформульовано рекомендації по зниженню контактних напружень в системі “покриття-основа” шляхом зміни модулів пружності та мікротвердостей компонентів системи, а також товщини покриття.

Вибір методу підвищення ресурсу підшипників кочення виконується за результатами експериментального дослідження зносостійкості зразків пар тертя з різними фізико-механічними властивостями матеріалів покриття і основи.

Захисні покриття утворюють вакуумно-плазмовою обробкою (метод іонного азотування в плазмі тліючого розряду і метод осадження іонів хрому і титану в вакуумі) і електроосадженням (гальванічний метод).

Запропонований в роботі [26] комплексний підхід до вибору технології захисту та зміцнення робочих поверхонь деталей прийнятий лише для деяких груп підшипників кочення. Дійсно, дослідження напруженого стану робочих поверхонь з покриттями необхідно, якщо контактне напруження матеріалу обумовлене зовнішньою силовою дією. Для надшвидкісних підшипників кочення контактне перенапруження матеріалу робочих поверхонь відбувається через сумісні дії силового відцентрового і термічного факторів. Тому для таких підшипників необхідно додатково оцінювати тепловий стан контакту.

Важливим для врахування тертя в підшипнику кочення є вплив виду спряження (точковий, лінійний, площинний), кінематику контакту (кочення, кочення з ковзанням, ковзання), а також вплив експлуатаційних властивостей мастильного середовища на тепловиділення та тепловідвід.

Крім того, в роботі [26] відсутні рекомендації з процедури керування фізико-механічними властивостями матеріалу покриття, через що не забезпечується потрібний ресурс підшипника.

З урахуванням викладеного алгоритм вибору технології захисту і зміцнення робочих поверхонь підшипників кочення з метою забезпечення потрібного ресурсу уявляється у вигляді схеми (рис. 2).

Технічне завдання (мета забезпечення ресурсу) може включати множину цілей, які визначаються конкретною групою підшипників, конструкцією спряжень деталей, характером пошкоджень. Наприклад, підвищення контактної витривалості підшипників загальномашинобудівного призначення – (M_1), підвищення задиростійкості торців роликів і бортів кілець роликотіт підшипників, що мають особливість сприймати осьові навантаження – (M_2), підвищення контактної витривалості робочих поверхонь підшипників від сумісної дії відцентрового та термічного навантажень – (M_3), і таке інше. Отож, узагальнена мета забезпечення ресурсу підшипників кочення може бути подана у вигляді:

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_s\} \quad (1)$$

База даних на підшипники кочення включає відомості про конструкції і технології виготовлення деталей, а саме: матеріали (M_o), технологічні методи

покращання властивостей матеріалів (T_M), вид спряження (C_K) тип елементів (E_H), підвищення надійності (утримання тіл кочення, покращання подачі мастила). Узагальнена база даних уявляється як:

$$B = \{M_o, T_M, C_K, E_H\}. \quad (2)$$

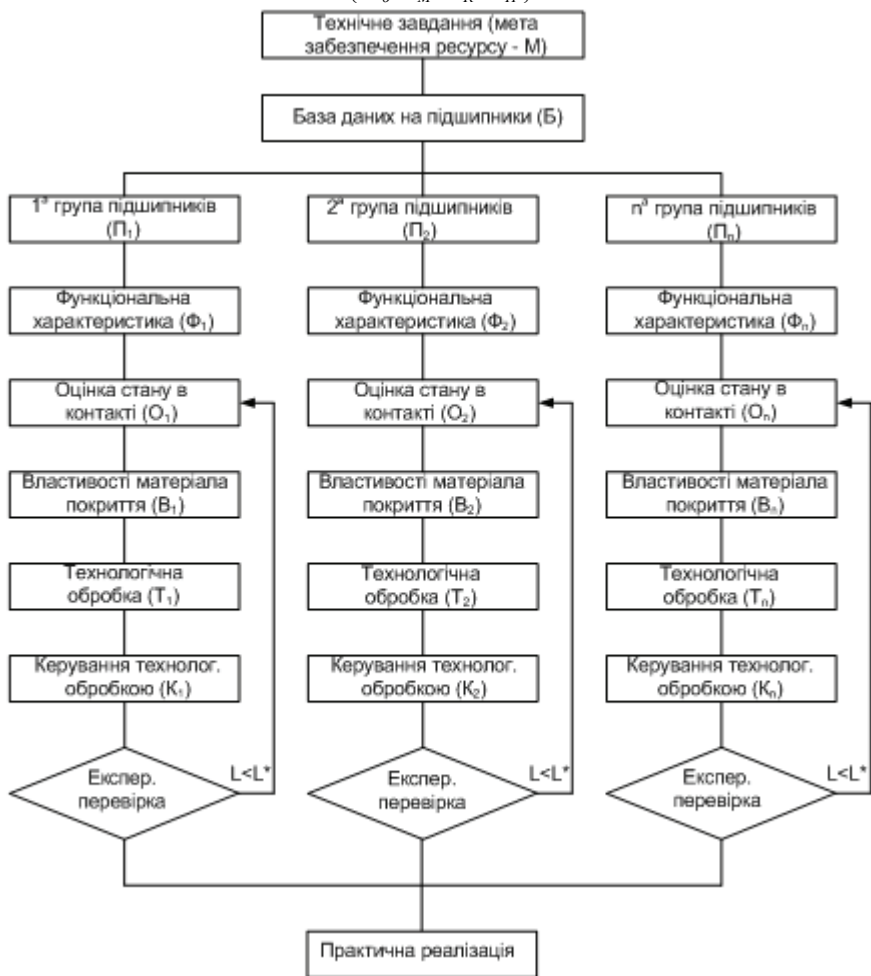


Рис. 2 Алгоритм вибору технологічного методу забезпечення ресурсу підшипників кочення.

Відомості про групи підшипників включають особливості їх експлуатації і навантаження статичні та динамічні, радіальні (H_p) і осьові (H_q), частоту обертання (χ_o) та характер її зміни, стан оточуючого середовища (O_c) і можуть мати вигляд:

$$\Pi_n = \{H_p, H_q, \chi_o, O_c\}. \quad (3)$$

Функціональна характеристика віддзеркалює зв'язок основної причини чи сукупності причин пошкодження з властивостями матеріалів покриттів (B_n) робочих поверхонь (твердість, коефіцієнт тертя, теплопровідність) і здатністю мастильного матеріалу (M_m) до зменшення тертя і зносу, підвищення теплозахисту і тепловідводу, і подається як:

$$\Phi_n = \{B_n, M_m\}. \quad (4)$$

Оцінка стану в контакті включає дослідження напруженого (σ), деформованого (ε) і температурного полів матеріалу і має вигляд:

$$O_n = \{\sigma_n, \varepsilon_n, t_n\}. \quad (5)$$

Властивості матеріалу покриття (B_n) визначається на базі оцінки стану в контакті і включає характеристики твердості (HRC), коефіцієнту тертя (f), коефіцієнтів теплопровідності (K_m) та теплоізоляції (K_{ii}) і подаються як:

$$B_n = \{HRC_n, f_n, K_{m_n}, K_{ii_n}\}. \quad (6)$$

Технологічна обробка (T_n), що забезпечує потрібний ресурс підшипника кочення, може включати відомі види (див.таблицю), причому кожен з видів має декілька методів, і уявляється у вигляді:

$$T_n = \{T_{1a}, \dots, T_{9u}\}. \quad (7)$$

Керування процесом технологічної обробки (K_n) має за мету забезпечення потрібного ресурсу підшипника кочення шляхом зміни режиму обробки і подається у вигляді:

$$K_n = \{K_{1a}, \dots, K_{9u}\}. \quad (8)$$

Керування процесом технологічної обробки робочих поверхонь підшипників кочення повинно здійснюватись виходячи з наступних міркувань. Зношування захисних покриттів залежить від складних процесів в контакті деталей, які визначаються умовами навантаження кінематики, властивостями матеріалів деталей і мастила, а також особливостями оточуючого середовища. Доля впливу факторів тертя, змащування оточуючого середовища на стан матеріалів покриття має невизначений характер. Тому, призначення необхідних фізико-механічних властивостей захисних покриттів на основі аналізу стану матеріала в контакті здійснюватиметься в умовах неповної інформації. Отож, найбільш прийнятним є керування властивостями захисних покриттів деталей підшипників кочення за схемою моделі "чорної скриньки (рис. 3) згідно відомого підходу, що викладений в роботі [27].

Вихідний сигнал $Y(t)$ у вигляді потрібного ресурсу спряжень тертя розглядається як реакція на некеруємі $V(t)$ та керуємі $U(t)$ компоненти вхідного сигналу $X(t) = \{V(t), U(t)\}$. Некеруємі компоненти $V(t)$ - навантаження, швидкості, теплові та інші потоки оточуючого середовища; керуємі компоненти $U(t)$ - кількість та склад керуючих елементів в матеріалі покриття, товщина покриття, комбінація декількох видів покриттів (багатошарові покриття). Методи знаходження керуємої вхідної дії $U(t)$ і

способи керування, а також результат керування в значній мірі визначаються інформацією про стан матеріалу покриття в зоні контакту.



Рис. 3 Схематичне уявлення керування властивостями захисного покриття деталей підшипників кочення.

Керування ресурсом покриття може здійснюватись трьома способами: регулюванням, керуванням параметрами, керуванням структурою. Регулювання застосовують, якщо суттєвим є дія неврахованих вхідних сигналів, або коли будь-які процеси на некеруємих вхідних сигналах $V(t)$ відрізняються від раніше прогнозуємих настільки, що система “сходе з потрібної траєкторії”. Тоді, спостерігаючи за реальною траєкторією $Y(t)$, знаходять величину $Y(t) - Y_0(t)$ і встановлюють додаткове до програмного керування, яке повинно повернути виходи системи на потрібну траєкторію $Y_0(t)$. Аналізуючи ситуацію із забезпеченням, наприклад втомної контактної міцності робочих поверхонь кілець і тіл кочення “сходження системи з потрібної траєкторії” можна тлумачити як зміну режиму навантаження чи швидкості обертання, що потребує відповідної зміни товщини покриття, або збільшити концентрацію легуючих елементів в матеріалі.

Якщо неможливо задати опорну програмну траєкторію на весь термін експлуатації чи ухилення від неї таке значне, що неможливо до неї повернутися (регулювання здійснюють при малих у відомому сенсі відхиленнях $Y(t) - Y_0(t) >$ виконують прогнозування виду траєкторії, $Y(t)$ і визначають можливість перетину траєкторії $Y(t)$ з областю цілей. Керування в цьому випадку зводять до регулювання параметрів системи доки не буде забезпечено вищезгадане перетинання. Така ситуація відповідає, наприклад, суттєвій зміні режиму експлуатації підшипника, коли неможливо збільшенням, наприклад, товщини покриття чи концентрації легуючих елементів матеріалу забезпечити потрібний ресурс. Необхідно змінити фізико-механічні характеристики матеріалу покриття. Тобто, наприклад, ввести нові легуючі елементи чи вибрати інший технологічний метод.

Серед можливих значень керуємих параметрів системи може не знайтися такого, що забезпечить перетин траєкторії з областю цілей. Це значить, що поставлена мета для такої системи не досяжна. Однак,

поставлена мета може бути досяжна для іншої системи з другою організацією структури. По суті виникає задача пошуку системи з іншим складом елементів та структури, але з однаковим вихідним сигналом $Y(t)$. Для забезпечення, наприклад, втомної контактної міцності робочих поверхонь деталей керування структурою (структурна адаптація) може здійснюватися шляхом застосування комбінованого багат шарового покриття різних товщин з відмінними фізико-механічними властивостями матеріалів.

Таким чином, вибір технологічного методу забезпечення ресурсу підшипників кочення шляхом утворення захисних покриттів на деталях, уявляється ланцюгом логічних дій:

$$M = B \Rightarrow \Pi_n \Rightarrow \Phi_n \Rightarrow O_n \Rightarrow B_n \Rightarrow T_n \Rightarrow K_n . \quad (9)$$

Вираз (9) може бути записано в більш компактному вигляді, якщо врахувати, що основними компонентами вибору технологічного методу забезпечення ресурсу підшипників кочення є множина цілей $M = \{M_1, M_2, \dots, M_s\}$, ознак покриття $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, оцінок стану $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$, технічних рішень $P = \{P_1, P_2, \dots, P_r\}$. Тоді найкращі властивості захисних покриттів деталей підшипників кочення буде досягнуто при умові:

$$(F : (\psi \cdot \phi(M_0)) \rightarrow P) \rightarrow opt , \quad (10)$$

де F - функція вибору технологічної обробки;

ϕ - бінарне відношення між елементами множини M, A ; $\phi \subset (M \times A)$;

ψ - бінарне відношення між елементами множини A, O ; $\psi \subset (A \times O)$;

M_0 - конкретна мета з множини цілей, $M_0 \subset M$.

Висновки:

1. Робочі поверхневі шари деталей переважної більшості сучасних підшипників кочення потребують підвищення стійкості проти механічного (абразивного, втомного, пластичним деформуванням) та молекулярно-механічного (заїдання, задир) зношуваль.
2. Недостатня зносостійкість підшипників кочення, невідповідність змащувальних властивостей мастила та недосконалість конструкцій деталей підшипників підшипникових вузлів сприяли появі значної кількості методів технологічної обробки робочих поверхонь деталей підшипників. Дотепер відсутня методологія вибору найбільш ефективного технологічного методу чи комбінації методів захисту та зміцнення робочих поверхонь деталей.
3. Пропонується комплексний теоретико-експериментальний підхід до вибору технологічних методів захисту та зміцнення робочих поверхонь деталей підшипників кочення з метою забезпечення потрібного ресурсу. Алгоритм, що реалізує запропонований підхід, не обмежує кількість чинників вибору технологічного методу,

дозволяє залучати як числову, так і якісну інформацію про характер функціонування поверхневих шарів деталей, дає змогу оцінити альтернативні варіанти методів забезпечення ресурсу підшипників, припускає можливість керування ресурсом деталей шляхом регулювання фізико-механічних характеристик матеріалу, зміни параметрів та структури покриттів.

Список літератури: 1.Пинегин С.В. Опоры качения в машинах.- М.: Изд-во АН СССР, 1961.- 152 с.; 2.Галахов М.А., Бурмистров А.Н. Расчет подшипниковых узлов.- М.: Машиностроение, 1988.- 272 с.; 3. К.Н. Явленского, В.Н.Нарышкина,и др.. Приборные шариковые подшипники. Справочник под ред. Е.Е. Чадаевой.- М.: Машиностроение, 1981.- 351 с.; 4.Фигатнер А.М. Расчет и конструирование шпиндельных узлов с подшипниками качения металлорежущих станков.- М.: НИИМаш.- 1971.- 195 с.; 5. Под ред. Н.А. Сагичина, М.М. Машнева Опоры осей и валов машин и приборов./- М.: Машиностроение, 1970.- 520 с.; 6.Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог.- М.: Машиностроение.- 2003.- 576 с.; 7.Цюренко В.Н., Петров В.А. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов.- М.: Транспорт.- 1982.- 96 с. 8. Под ред. В.А. Баумана, И.И. Быховского, Б.Г. Гольдштейна Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник./- М.: Машиностроение, 1970.- 548 с. 9.Комиссар А.Г. Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации: Справочник.- М.: Машиностроение, 1987.- 384 с. 10. Качество машин: Справочник в 2-х т.- М.: Машиностроение, 1995.- т.1.- 256 с.- т. 2.- 430 с. 11. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение деталей машин: Справочник.- М.: Машиностроение, 1986.- 320 с. 12. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2-х т.- М.: Машиностроение.- 1995.- т.1.- 832 с.- т.2.- 688 с. 13. Махов А.В., Пронин В.Б. Повышение долговечности пар трения// Подшипниковая промышленность.- 1984.- № 6.- с. 16-19. 14. Гинберг А.М., Иванов А.Ф. Износостойкие и антифрикционные покрытия.- М.: Машиностроение.- 1982.- 44 с. 15.Спришевский А.И. Подшипники качения.- М.: Машиностроение.- 1969.- 632 с. 16. Лазаренко Ю.А., Старостин В.Ф., и др. Способ повышения износостойкости рабочих поверхностей прецизионных шарикоподшипников// Подшипниковая промышленность.- 1979.- № 3.- с. 10-13. 17.Чириков В.Г. Повышение качества, надежности и долговечности подшипников за счет химико-термического упрочнения.- М.: НИИНАвтопром.- 1867.- 60 с. 18. Под ред. Д.Н. Решетова Энциклопедия. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV-1/- М.: Машиностроение.- 1995. – 864 с. 18. Бойков В.А., Кулаков А.Н., и др Технология и оборудование для ионной цементации// Подшипниковая промышленность.- 1983.- № 2.- с. 28-36. 19.Селяхович Б.Н. Ионная обработка рабочих поверхностей подшипников качения// Подшипниковая промышленность.- 1985.- № 2.- с. 30-33. 20. Иванов А.Ф., Мещерякова Л.И. Пути экономии дефицитных материалов в гальваническом производстве подшипниковой промышленности// Подшипниковая промышленность.- 1983.- № 12.- с. 16-19. 21. Гаркунов Д.Н. Триботехника (Конструирование, изготовление и эксплуатация машин).- М.: Машиностроение.- 2002.- 632 с. 22. Гайдамака А.В. Про ефективність нової технології підвищення довговічності підшипників качення// Вісник НТУ “ХП”.- 2007.- Вип. 21.- с. 144-146. 23. Коротков В.А. О концепции выбора методов упрочнения// Вестник машиностроения.- 1996.- № 1.- с. 21-22. 24. Зенкін М.А. Технологічні основи забезпечення якості поверхневого зміцнення відповідальних деталей машин/ Автореф. Дис. На здобуття ступ. докт. техн. наук, Харків.- 2005.- 39 с. 25. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників качення/ Автореф. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук, Київ.- 2004.- 19 с. 25. Растринин Л.А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем.- Рига.: Зинатне.- 1965.- 211 с.

Поступила в редколлегию 21.04.08